

10/587797

WO 2005/074041

PCT/EP2005/000889

JAP20 Rec'd PCT/PTO 31 JUL 2006

5

10

15

Verfahren zur Energieumwandlung solarer Strahlung in elektrischen Strom und Wärme mit farbselektiven Interferenzfilterspiegeln und eine Vorrichtung eines Konzentrator-Solarkollektors mit farbselektiven Spiegeln zur Anwendung des Verfahrens

25

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung eines Konzentrator-Solarkollektors, um Sonnenstrahlung mit Hilfe farbselektiver Spiegel in verschiedene Spektralfarben aufzusplitten und auf mehrere für verschiedene Lichtfarben optimierte Halbleiter-Photovoltaikzellen zu konzentrieren. Sie dient der Energieumwandlung solarer Strahlung in elektrischen Strom und Wärme mit hohem Wirkungsgrad.

Es gibt bereits verschiedene solare Strahlungskollektoren und -energiewandler. Thermische Sonnenkollektoren, die die auftreffenden Sonnenstrahlen in Wärmeenergie umwandeln, um damit ein Trägermedium (Wasser, Öl, Gas, etc.) zu erhitzen, sind vielfach im Einsatz für Raumklimatisierung und in Kombination mit thermodynamischen Kreisprozessen, wie Wärmepumpen, Stirlingmotoren und Rankine-Kreisprozessen. Diese indirekte Umwandlung der exergiereichen Solarstrahlung über den Umweg anergiereicher Wärmeenergie wiederum zu exergiereicher Elektroenergie ist verlustreich und prinzipiell durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt. Um hohe Temperaturen zu erreichen, sind Konzentratortechnologien, wie Hohlspiegel oder Fresnel-Spiegelfelder erforderlich, die nur Direktstrahlung, nicht jedoch Diffuslicht bei Bewölkung nutzen können. Thermische Solarkraftwerke zur Stromerzeugung sind daher meist nur in besonders sonnenreichen Gebieten wirtschaftlich sinnvoll. Zur direkten Umwandlung von Licht in elektrischen Strom kommen Halbleiter-„Photozellen“ zum Einsatz. Grundsätzlich sind die einzelnen Halbleitermaterialien oder -kombinationen nur für bestimmte Spektralbereiche der einfallenden Solarstrahlung geeignet. Ein großer Anteil der Strahlungsenergie kann also zur Stromerzeugung nicht genutzt werden. Sie wird zu Wärme und eine Temperaturerhöhung erhöht die Rekombinationsverluste in den Halbleitern bei der photovoltaischen Energieumwandlung. Für großflächige Anwendungen haben Flachkollektoren aus polykristallinem Silizium im

Markt bisher die weiteste Verbreitung gefunden. Sie erreichen bisher typisch 12 - 17 % Wirkungsgrad und können Direkt- und Diffuslicht nutzen. Es sind neben Silizium weitere Halbleiter-Materialien bekannt, die für bestimmte Lichtfarben eine hohe Quanteneffizienz aufweisen. Dazu zählen insbesondere GaAs, CdTe, GaInP, InP, GaInN, CuS₂, CuInS₂, CuIn(GaSe)₂, Ge, CdSe, a-Si:H und diverse Legierungen mit 4 und mehr Legierungselementen, insbesondere mit Anteilen von Elementen der 3. und 5. Hauptgruppe. Viele dieser Legierungen sind in der Herstellung gegenüber Si relativ teuer. Die Herstellungskosten von so erzeugtem Solarstrom können bisher nicht mit denen anderer Energiequellen konkurrieren. Dünnschicht-Technologien versprechen hier Kostensenkungspotenziale, wie auch mikroporöse DSC- und Quantenpunkt-Strukturen, wie z. B. die Graetzelzelle. Die Verlustmechanismen in den einzelnen für Solarzellen bekannten Halbleitermaterialien können kaum weiter optimiert werden, weil sie aus physikalischen Gründen durch das verwendete Material vorgegeben sind. Dies führt zu einem theoretisch maximalen Wirkungsgrad von beispielsweise etwa 27 % bei Silizium höchster Reinheit. Schichtsysteme aus Halbleitermaterialien mit unterschiedlichen Bandlücken zur Nutzung größerer Spektralbereiche sowie nanoporöse Schichtsysteme lassen ggf. noch eine Steigerung der Flächenwirkungsgrade erwarten. Weitere Kostenoptimierungspotenziale sind Konzentratortechnologien. Anstelle relativ teurer großer Halbleiterflächen versucht man, mit

preiswerten optischen Komponenten, wie Linsen oder Hohlspiegeln, das Licht zu bündeln, um dann mit hoch aufkonzentrierter Lichtstärke kleine aber hocheffiziente Halbleiterflächen zu beleuchten. Damit 5 lassen sich zwar die Halbleiterkosten pro Fläche und pro Watt deutlich reduzieren, jedoch eignen sich Konzentratortechnologien wenig zur Nutzung von Diffus-Strahlung, was in gemäßigten Klimazonen mit häufiger Bewölkung besonders nachteilig ist. Es 10 bedingt besonders hohe Zellenwirkungsgrade, um wenigstens den gleichen Jahresenergieertrag pro Fläche zu erreichen, wie herkömmliche Photovoltaik-Flachzellenmodule. Diese erhöhte Zelleneffizienz zu erreichen, bedingt Stapelzellentechnik 15 (Schichtsysteme mit mehreren verschiedenen Halbleiterschichten) oder die Umwandlung photovoltaisch mit dem gegebenen Photozellen-Halbleiter nicht nutzbarer Wellenlängen in nutzbare Wellenlängen, z. B. mit Photonenteiler- oder 20 Luminiszenz-Schichten. Nachteilig bei solchen Mehrfach-Schichtstapeln ist, dass in Deckschichten bereits ein Teil auch der Strahlungsanteile absorbiert und thermalisiert oder auch reflektiert wird, der eigentlich in den unteren Schichten 25 ankommen soll. Zudem sind mehr Herstellungsschritte erforderlich, die die Kosten erhöhen. Ein ebenfalls bekannter Ansatz, diese Verluste zu reduzieren ist die räumliche Auf trennung solarer Strahlung in seine Lichtfarben. Diese definierten Wellenlängenbereiche 30 des Lichts werden dann auf ebenso räumlich getrennte Solarzellen aus für die jeweilige Lichtfarbe optimierten Halbleitern gerichtet. Holografische

Konzentratoren über Beugungsgitter zeigten wiederum neue Verlust- und Problemquellen (Absorptions- und Streuverluste sowie UV-Licht-, Alterungs- und Feuchtigkeitsbeständigkeit der Hologramme) und 5 konnten im Markt bisher keine Verbreitung finden. Interferenzspiegel sind hierfür besser geeignet. Es ist lange bekannt, dass durch Interferenz an dünnen Schichten, Reflexionen verstärkt oder abgeschwächt werden können. Konstruktive Interferenz kommt z. B. 10 bei dielektrischen Spiegeln und optischen Farbfiltern zum Einsatz und auch Wärmeschutzgläsern, um die Reflexion für einen gewünschten Wellenlängenbereich zu verstärken. Destruktive Interferenz nutzt man für entspiegelnde Schichten, so dass man bei 15 unbeeinflusster Absorption deutlich höhere Transmissionsgrade z. B. bei Glasscheiben und fotooptischen Linsen erzielen kann (Unterdrückung von Reflexionen). Durch Übereinanderschichten von vielen hochtransparenten dielektrischen Schichten, durch 20 Variation der Schichtdicken und Brechungsindizes, kann man mit konstruktiver Interferenz auch größere spektrale Bandbreiten abdecken und hohe Reflexionsgrade bis über 99% erzielen. So haben sich z.B. abwechselnde $\leftrightarrow/4$ Schichten aus Siliziumdioxid 25 und Tantalpentoxid als Interferenzspiegel bewährt. Die bisherige Herstellung dieser Interferenzspiegel durch Magnetron-Sputtern im Hochvakuum ist um so teurer, je mehr Schichten erforderlich sind. Diese Kosten ergaben bisher keine Kostenvorteile gegenüber 30 der Herstellung von Stapelzellen. Auch andere transparente Stoffe mit sehr unterschiedlichem optischen Brechungsindex können solche Schichtsysteme

bilden. In jüngster Zeit gibt es Interferenz-Spiegelfolien aus Kunststoff bzw. es wird auch über Herstellungsprozesse aus kunststoffartigen organischen oder anorganischen Weichgläsern 5 berichtet, die als vergleichsweise preisgünstige Folien im Laminations- und Ziehverfahren auch mit mehreren Hundert $\leftrightarrow/4$ Schichten herstellbar sind. Problematisch bei solchen Folien ist die UV-Licht- und Alterungsbeständigkeit, Feuchtebeständigkeit, 10 elektrostatische Aufladung (Verschmutzungsneigung) und mechanische Stabilität, was einen Einsatz unter Witterungsbedingungen in Solarkollektoren bisher als wenig geeignet erscheinen ließ und sich Einsatzbereiche solcher farblich schillernder Folien 15 mehr im Bereich dekorativer Verpackungsfolien finden ließen. Ein weiteres Problem beim Einsatz in Solarkollektoren ist die Oberflächenverschmutzung und Haltbarkeit solcher Interferenzspiegel-Schichten unter Witterungsbedingungen.

20 Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, für solare Strahlung geeignete Interferenzfilter-Materialien und -anordnungen zu finden, die sich kostengünstig herstellen lassen und deren Verschmutzungsneigung, 25 Verfärbung bzw. Korrosion unter Einfluss wechselnder Temperaturen, Luftfeuchtigkeit auch im Taupunktbereich sowie Staubeinwirkung gering ist.

Die Aufgabe wird folgendermaßen gelöst:

30 Kennzeichnend für die erfindungsgemäße Vorrichtung ist, dass das Licht mit beweglichen Interferenzspiegelfolien in mindestens zwei spektrale

Wellenlängenbereiche getrennt wird, wobei an jeder Folie jeweils ein Wellenlängenbereich reflektiert und ein Teil transmittiert wird.

5 Die direkte Sonnenstrahlung wird vorher refraktiv, z. B. mit Fresnel-Linsen, oder reflektiv, z. B. mit Hohlspiegeln oder Fresnel-Hohlspiegeln (Spiegelfeld), gebündelt. Vor dem optischen Brennpunkt werden eine oder mehrere solche Interferenzspiegelfolien
10 angeordnet, so dass es jeweils einen optischen Brennpunkt für die reflektierte und auch für die transmittierte Lichtfraktion ergibt. Im Bereich dieser optischen Brennpunkte werden Photozellen aus solchen Halbleitermaterialien angeordnet, die für den
15 jeweiligen Wellenlängenbereich eine möglichst optimale Effizienz bei der Umwandlung von Lichtstrahlung in elektrischen Strom aufweisen. Die farbselektiven Interferenzspiegel werden mit Folien realisiert, die wie ein Film im Kino langsam von
20 Rolle zu Rolle durch den Lichtkegel bewegt werden. Dies bietet den Vorteil, dass preiswerte Kunststoff-Folienlaminate verwendet werden können. Viele optisch transparente, aber preiswerte Kunststoffe weisen bei starker Lichteinwirkung, insbesondere bei UV-haltiger
25 Solarstrahlung Alterungerscheinungen auf, wie allmähliches Vergilben, Versprödung mit Festigkeitsverlust oder Schrumpfung. Durch Einwirkung von Feuchtigkeit und Staub kann dieser Prozess verstärkt und auch die optischen Eigenschaften der
30 Oberfläche ungünstig beeinflusst werden. Durch die kontinuierliche Erneuerung des im Lichtkegel befindlichen Folienabschnitts können

Funktionsbeeinträchtigungen der Filterspiegel durch lichtinduzierte Degradation und Verschmutzung zuverlässig vermieden werden. Dieser Filmtransport-Prozess kann je nach Folienwerkstoff und Lichtstärke 5 Wochen, Monate oder Jahre dauern. Je nach Länge der Folienrollen können somit auch sehr lange Betriebszeiten über mehrere Jahre erreicht werden, ohne dass es eines Austauschs und Erneuerung der Folienrollen bedarf. Für die lichtdurchführenden 10 Konstruktionselemente (Fresnel-Linsen, Interferenzspiegelfolien) der erfindungsgemäßen Vorrichtung werden vorzugsweise Werkstoffe eingesetzt, die neben dem sichtbaren Spektrum auch eine hohe Durchlässigkeit für NIR-Strahlung bis etwa 15 2 µm aufweisen. Flour-Polymer und Flourid-Weichgläser lassen Sonnenlicht in einem breiten Frequenzspektrum hindurch. Eine Transparenz für UV-Strahlung verringert die Degradation der Folien und verbessert die Energieausbeute. Einsetzbar für einen breiten Spektralbereich bis in den NIR hinein sind 20 dünne Schichtsysteme in Form von thermoplastischen Folien mit transparenten Basiskunststoffen (PMMA, PC, Styrole) mit Anteilen aus Tellur oder Flourverbindungen. Es werden jeweils zwei Kunststofffolien mit unterschiedlichem optischen Brechungsindex im Bereich der Erweichungstemperatur mehrfach übereinander laminiert, bis die Schichtdicke 25 der Einzelschichten ein Viertel der zu reflektierenden Wellenlänge beträgt. Die in den optischen Brennpunkten vor und hinter der bzw. den 30 Interferenzspiegelfolien angeordneten Photozellen werden mit einer hohen Beleuchtungsstärke bestrahlt,

typisch im Bereich 50-2500-facher Sonnenkonzentration. Die Zellen benötigen auf ein den zu erwartenden Photostrom abgestimmtes Design (Konzentratorzellen). Wenn die Bandlücke des 5 Halbleiters gut auf den jeweiligen Lichtfarben-Bereich abgestimmt ist, ist die Quanteneffizienz der photovoltaischen Umwandlung hoch und die Wärmeentwicklung anteilig entsprechend geringer. Die dennoch entstehende Wärme muss jedoch abgeführt 10 werden, z. B. über eine Wasserkühlung. Die Photozellen werden deshalb auf einem Kühlkörper angeordnet, der mit einem Kühlmedium durchströmt werden kann. Neben Wasser und wässrigen Lösungen können dabei auch organische Lösungsmittel, 15 klassische Kältemittel (z. B. R134, Propan, etc.), binäre Lösungen (z. B. Ammoniaklösung) oder unter höherem Betriebsdruck auch Gase (wie Helium) zum Einsatz kommen. Neben dem Betrieb von Heizungen lassen sich so auch z. B. Absorptionskältemaschinen, 20 ORC-Anlagen (Organic-Rankine-Cycle), Villumier-Wärmepumpen und MCE-Wandler (Magneto-Caloric-Effect) betreiben.

Ein sehr dünnes Schichtsystem mit thermionischer 25 Funktion aus z. B. $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ (Thermodiode) zwischen Solarzelle und Kühlkörper kann den entstehenden Wärmefluss teilweise ggf. in elektrischen Strom umwandeln. Somit kann man den elektrischen Wirkungsgrad nochmals erhöhen. Anstelle 30 auf eine Solarzelle kann eine Lichtfraktion auch in einen Lichtwellenleiter (LWL) eingespeist werden. So lässt sich z. B. blaues Licht bei Sonne für

photochemische Reaktionen in einem geschlossenen Reaktionsgefäß nutzen, das auch in unbeleuchteten Räumen installiert sein kann.

5 Ein Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Vorrichtung mit refraktiven Konzentratoren ist in Figur 1 dargestellt.

In einem Rahmen 6 sind in der dem Licht zugewandten 10 lichtdurchlässigen oberen Begrenzungsplatte konvexe Fresnel-Linsen 1 eingearbeitet. Sie werden jeweils senkrecht zum Sonnenstand ausgerichtet, wobei die Außenseite der oberen Begrenzungsplatte vorzugsweise eine Antireflex- oder Easy-To-Clean-Beschichtung 15 (schmutz- und wasserabweisende Oberfläche) aufweisen kann. Darunter befindet sich eine untere Begrenzungsplatte 8, die parallel zur oberen Begrenzungsplatte mit den Fresnel-Linsen 1 angeordnet ist und mit dieser und den Seitenwänden des Rahmens 6 20 einen weitgehend staub- und wasserdichten Kasten bildet. Die Tiefe des Rahmens 6, d. h. der Abstand zwischen oberer Fresnel-Linse 1 und unterer Begrenzungsplatte 8, entspricht etwa der Brennweite der verwendeten Fresnel-Linsen 1. Auf der unteren 25 Begrenzungsplatte 8 befinden sich Germanium-Photozellen für NIR-Strahlung 5b genau an der Stelle, wo der Brennpunkt der Fresnel-Linsen 1 liegt. Sie sind auf Kühlkörper 7 montiert, die mit einer Flüssigkeit durchströmt werden können. Werden die 30 Fresnel-Linsen 1 senkrecht zur Sonne ausgerichtet, bildet sich jeweils ein Lichtkegel und die Strahlung wird auf die jeweilige, im Vergleich zur Fresnel-

Linse kleinflächige Germanium-Photozelle für NIR-Strahlung 5b gebündelt. Der Halbleiter Germanium hat eine geringe Bandlücke und ist in einer Photozelle besonders für NIR-Strahlung bis 2 µm effizient, für sichtbares Licht jedoch weniger geeignet. Zwischen den Fresnel-Linsen 1 und der unteren Begrenzungsplatte 8 wird eine mehrere Meter lange Interferenzspiegelfolie 2 in Form eines Bandes angeordnet, das auf eine Spindel 3 aufgewickelt ist.

Von dieser abspulenden Spindel 3 wird es im Laufe der Nutzungszeit der Vorrichtung auf eine aufspulende Spindel 4 umgespult, so dass die Interferenzspiegelfolie 2 langsam durch den jeweiligen Lichtkegel der Fresnel-Linsen 1 gezogen wird. Die Interferenzspiegelfolie 2 besteht aus mehreren Lagen von zwei alternierend übereinander geschichteten transparenten Kunststoffen mit unterschiedlichem optischen Brechungsindex, z. B. PMMA und Polystyrol. Alternativ können auch andere Kunststoffe mit besserer UV-Licht-Beständigkeit und NIR-Transparenz zum Einsatz kommen. Die Schichtdicke dieser Kunststofflagen muss im Bereich 88 - 200 nm liegen, wodurch sich eine hohe Reflexion für Wellenlängen im VIS-Bereich (350 - 800 nm) ergibt, während NIR-Strahlung transmittiert wird. Der Abstand dieser Interferenzspiegelfolie 2 zwischen den Fresnel-Linsen 1 und der unteren Begrenzungsplatte 8 ist etwa gleich, so dass der Brennpunkt des von der Interferenzspiegelfolie 2 reflektierten VIS-Lichts sich kurz vor dem Zentrum der Fresnel-Linse 1 der oberen Begrenzungsplatte befindet. In diesem Brennpunkt im Zentrum der Fresnel-Linse 1 wird

ebenfalls auf einem flüssigkeitsdurchströmten Kühlkörper 7 eine Silizium-Photozelle für VIS-Strahlung 5a angeordnet. Der Halbleiter Silizium hat eine größere Bandlücke als Germanium und ist in einer 5 Photozelle für VIS-Strahlung 5a einsetzbar, für NIR-Strahlung ab 1,2 µm jedoch nicht geeignet. Anstelle von Silizium und Germanium können auch andere Halbleiter eingesetzt werden, wie GaAs, CdTe, GaInP, InP, GaInN, etc. wie eingangs erwähnt.

10

In Figur 2 ist eine Ausführungsform der Erfindung dargestellt, die nicht nur zwei sondern vier verschiedene Wellenlängenbereiche (Lichtfarben) auf vier verschiedene Photozellen richtet. Gegenüber der 15 Ausführungsform in Figur 1 kann damit ein noch besserer elektrischer Wirkungsgrad erzielt werden. Die Deckplatte aus Glas ist auf der Außenseite mit einem witterungsbeständigen mehrlagigen Interferenzspiegel-Schichtsystem, z. B. aus 20 Siliziumdioxid und Tantalpentoxid mit jeweils 55 - 110 nm Schichtdicke versehen, das UV- und Blaulicht reflektiert und grüne, gelbe, rote und nahinfrarote Strahlungsanteile bis mindestens 2 µm Wellenlänge transmittiert. Die Glasplatte wird schalenförmig 25 gewölbt geprägt und auf der Innenseite weist sie die Fresnel-Linsen mit frontseitigem Interferenzhohlspiegel für blaues Licht 10 mit ihren typischen Rillenstrukturen auf. Die schalenförmigen Wölbungen mit dem Interferenzspiegel-Schichtsystem 30 haben jeweils die Funktion eines Hohlspiegels. Wird der Rahmen 6 mit den Fresnel-Linsen mit frontseitigem Interferenzhohlspiegel für blaues Licht 10 senkrecht

zur Sonne ausgerichtet, bildet sich durch die schalenförmigen Wölbungen mit dem Interferenzspiegel-Schichtsystem oberhalb dieser Hohlspiegel mit dem reflektierten UV- und Blaulicht jeweils ein
5 Lichtkegel. In den Brennpunkten dieser Hohlspiegel werden jeweils Photozellen 15a angeordnet, die eine hohe Quanteneffizienz für Blau- und UV-Strahlung aufweisen, z. B. aus InGaP oder CdS. Unter den Fresnel-Linsen mit frontseitigem
10 Interferenzhohlspiegel für blaues Licht 10 entsteht jeweils ein Lichtkegel aus den nicht reflektierten grün, gelb, rot und NIR-Lichtanteilen, die mit erfindungsgemäßen Interferenzspiegelfolien 2 weiter fraktioniert werden. Zwischen den Fresnel-Linsen mit
15 frontseitigem Interferenzhohlspiegel für blaues Licht 10 und der unteren Begrenzungsplatte 8 werden zwei verschiedene Interferenzspiegelfolien 2 in Form von Bändern übereinander angeordnet, die jeweils von einer abspulenden Spindel 3 zu einer aufspulenden
20 Spindel 4 durch den Lichtkegel gespult werden. Eine relative Bewegung der Interferenzspiegelfolien 2 innerhalb des Lichtkegels kann auch durch axialen Versatz der Spindeln 3, 4 in Bezug auf die Zone mit der höchsten Lichtkonzentration erfolgen, da in den
25 Randbereichen des Lichtkegels aufgrund geringerer Strahlungskonzentration und Verweilzeit mit einer geringeren Folienschädigung durch lichtinduzierte Degradation zu rechnen ist. Wenn die Folie von der abspulenden Spindel 3 zu der aufspulenden Spindel 4
30 umgespult worden ist, kann daher durch axiale Verschiebung der Spindeln 3 und 4 die Folie wieder auf die erste Spindel 3 zurückgespult werden und

somit die Nutzungszeit der jeweiligen Interferenzspiegelfolie 2 verlängert werden. Während die erste Interferenzspiegelfolie für grüne und gelbe VIS-Strahlung 12a den Wellenlängenbereich von ca. 440
5 - 650 nm (grün und gelb) auf eine darauf optimierte Photozelle für grüne und gelbe VIS-Strahlung 25b, z. B. aus GaAs, reflektiert, wird die in einem Abstand darunter liegende zweite Interferenzspiegelfolie für rote VIS-Strahlung 12b für den Reflexionsbereich von
10 etwa 650 - 1100 nm ausgelegt. In deren oberem Brennpunkt, zwischen den beiden Interferenzspiegelfolien 2 angeordnet, kann z. B. eine doppelseitige Photozelle für rote VIS-Strahlung 15c ihre optimale Effizienz entfalten. Das Gehäuse
15 für die Flüssigkeitskühlung mit dem Kühlkörper 5c der Photozelle 15c ist vorzugsweise transparent für den Strahlungsbereich 650 - 2000 nm, ebenso wie das Kühlmedium. Die untersten Photozellen für NIR-Strahlung 5d auf der unteren Begrenzungsplatte 8 sind
20 wiederum für die NIR-Strahlung 1,1 - 2 µm optimiert, und könnten beispielsweise aus dem Halbleiter Germanium oder InGaAs bestehen. Mehrere solcher Rahmen 6 können auf geeigneten Gestellen oder an Masten montiert werden, ausgestattet mit
25 Drehantrieben, die die Rahmen 6 jeweils senkrecht zur aktuellen Sonnenposition ausrichten, so dass die direkte Lichtstrahlung durch die Fresnel-Linsen mit frontseitigem Interferenzhohlspiegel für blaues Licht
10 immer auf die Photozellen fokussiert ist.

30 In Figur 3 ist eine erfindungsgemäße Vorrichtung mit reflektivem Konzentrator dargestellt, bei der das

Aufkonzentrieren der Sonnenstrahlung mit Fresnel-Hohlspiegeln 11 erfolgt. Diese können mit Einzelspiegeln, die zur Sonnenstandsnachführung beweglich auf Dach-, Fassaden- oder Freiflächen 5 angeordnet sind, realisiert werden. Die solare Direktstrahlung wird auf einen Solarreceiver in Form eines Rahmens 6 gerichtet, der hinreichend witterungsgeschützt mehrere aus verschiedenen Halbleitern bestehende Photozellen sowie eine oder 10 mehrere erfindungsgemäße Interferenzspiegelfolien 2 enthält, die jeweils von einer abspulenden Spindel 3 auf eine aufspulende Spindel 4 durch den in den Solarreceiver eintretenden Lichtkegel der Fresnel-Hohlspiegel 11 oder durch einen von der ersten 15 Interferenzspiegelfolie für blaue VIS-Strahlung oder UV- und blaue VIS-Strahlung 22a bereits reflektierten Lichtkegel gespult werden. In dieser Ausführungsform werden die Interferenzspiegelfolien 2 so dimensioniert, dass die für die jeweiligen 20 Photozellen 15a, 25b, 15c, 5d optimalen Reflexionswellenlängen der einzelnen Interferenzspiegelfolien 22a, 22b, 2c bei einem Beleuchtungswinkel von etwa 45° eintreten.

25 In Figur 4 ist ein Solarreceiver für die in Figur 3 dargestellte Fresnel-Hohlspiegel-Anordnung gezeigt. Hierbei spiegelt eine im Lichteintrittsbereich des Rahmens 6 angeordnete Interferenzspiegelfolie für blaue und grüne VIS-Strahlung 32a einen definierten 30 Spektralbereich des Lichts, z. B. blau, grün und gelb, auf eine außerhalb des Rahmens 6 befindliche Photozelle für blaue und grüne VIS-Strahlung 45a, z.

B. aus GaAs. Die von der ersten Interferenzspiegelfolie für blaue und grüne VIS-Strahlung 32a transmittierten Strahlungsanteile rot und NIR werden auf eine zweite 5 Interferenzspiegelfolie für gelbe und rote VIS-Strahlung 32b gerichtet, die den roten Lichtanteil z. B. auf eine Si-Photozelle für gelbe und rote VIS-Strahlung 35b reflektiert und NIR transmittiert, welches auf eine Germanium-Photozelle für NIR-10 Strahlung 5c fällt.

In Figur 5 ist ebenfalls ein Solarreceiver für die in Figur 3 dargestellte Fresnel-Hohlspiegel-Anordnung gezeigt. Hier wird die Tatsache ausgenutzt, dass die 15 gleiche Interferenzspiegelfolie für blaue und grüne VIS-Strahlung 32a, bestrahlt mit einem Eintrittswinkel von etwa 0° einen anderen Wellenlängenbereich reflektiert, als dies bei einem flacheren Bestrahlungswinkel, z. B. etwa 45° der Fall 20 ist. Im Ausführungsbeispiel Figur 5, wird die Interferenzspiegelfolie für blaue und grüne VIS-Strahlung 32a eine jeweilige Schichtdicke der alternierenden Kunststoffsichten im Bereich 100 - 25 132 nm aufweisen und bei senkrechter Bestrahlung das blaue und grüne Licht reflektieren, während gelb, rot und NIR transmittiert werden. Passiert dieser zunächst transmittierte Strahlungsanteil nochmals die gleiche Folie, nun aber in einem steileren Winkel, z. B. ca. 40° - 50° , wird nun auch das gelbe Licht 30 reflektiert, während rot und NIR wiederum weitgehend transmittiert werden.

In Figur 6 ist dargestellt, dass ein oder mehrere der mit Interferenzspiegelfolien 2 aufgetrennten Lichtanteile auch anstelle einer Photozelle in einen Lichtwellenleiter 9, z. B. flüssigkeitsgefüllter Schlauch, eingespeist und über begrenzte Entfernung an einen anderen Ort transportiert werden können. Dieser Anwendungsfall wird anhand der bereits auf Figur 1 dargestellten Ausführungsform der Vorrichtung mit refraktivem Licht-Konzentator aufgezeigt. Der Brennpunkt der Fresnel-Linse 1 liegt bei genauer Sonnenstandsausrichtung im Bereich des Glasfasereintritts. Eine beliebige Anzahl solcher Lichtwellenleiter 9, wird zusammengefasst und die Strahlung kann am anderen Ende dieser Lichtwellenleiter 9 z. B. auf einen photochemischen Reaktor, auf eine Photozelle für NIR-Strahlung 55b oder andere zu beleuchtende Flächen bzw. Räume gerichtet werden. Dies kann Vorteile bieten. So kann sich ein Photoreaktor in einem separaten Raum (beheizt oder wärmegedämmt) oder eine Photozelle direkt in einem Kühlwasserreservoir (z. B. Swimmingpool) befinden. Anstelle von z. B. Quarzglas-Lichtwellenleitern sind auch flüssigkeitsgefüllte Schläuche als LWL einsetzbar, wobei Wärmeverluste reduziert und Die Kühlung einer Photozelle vereinfacht werden kann

Die erfindungsgemäße Vorrichtung unterscheidet sich von bisher bekannten Solarkollektoren sowie von anderen Lichteinspeisevorrichtungen für Lichtwellenleiter dadurch, dass das Licht mit beweglichen Interferenzspiegelfolien 2 in mindestens

zwei spektrale Wellenlängenbereiche getrennt wird, wobei an jeder Interferenzspiegelfolie 2 jeweils ein Wellenlängenbereich reflektiert und ein Teil transmittiert wird. Die direkte Sonnenstrahlung wird vorher refraktiv, z. B. mit Fresnel-Linsen 1, oder reflektiv, z. B. mit Hohlspiegeln oder Fresnel-Hohlspiegeln 11 (Spiegelfeld), gebündelt. Vor dem optischen Brennpunkt werden eine oder mehrere solche Interferenzspiegelfolien 2 angeordnet, so dass es jeweils einen optischen Brennpunkt für die reflektierte und auch für die transmittierte Lichtfraktion ergibt. Im Bereich dieser optischen Brennpunkte werden Photozellen aus solchen Halbleitermaterialien angeordnet, die für den jeweiligen Wellenlängenbereich eine möglichst optimale Effizienz bei der Umwandlung von Lichtstrahlung in elektrischen Strom aufweisen. Die farbselektiven Interferenzspiegel werden mit Interferenzspiegelfolien 2 realisiert, die langsam von Rolle zu Rolle über die Spindeln 3 und 4 durch den Lichtkegel bewegt werden.

Die Erfindung bietet mehrere Vorteile.
Die Konzentratortechnologie hat den Vorteil, dass das Licht mit relativ preiswerten optischen Komponenten (Spiegel, Fresnel-Linsen) auf nur kleine Halbleiterflächen konzentriert wird und so teurer Halbleiterfläche eingespart wird.

Das Auftrennen der Solarstrahlung in mehrere Wellenlängenbereiche (Lichtfarben) bietet den Vorteil, dass verschiedene Halbleiter-Photozellen,

die auf die jeweiligen Wellenlängen optimiert sind, mit einer höheren photovoltaischen Umwandlungseffizienz betrieben werden können, was den elektrischen Wirkungsgrad insgesamt verbessert.

5

Das langsame Spulen mit den Spindeln 3 und 4 der Interferenzspiegelfolien 2 von Rolle zu Rolle durch den Lichtkegel hat den Vorteil, dass eventuell auf diese Oberfläche gelangte Schmutzpartikel und Schäden durch Feuchtigkeit, eingebrannte Schmutzpartikel und lichtinduzierte Degradation nicht dauerhaft beeinträchtigend wirken, da die beanspruchten Folienabschnitte laufend erneuert werden. Diese dünnen Interferenzspiegelfolien 2 können aus sehr preisgünstigen und großtechnisch verfügbaren Kunststoff-Rohstoffen in Massenproduktion durch Laminations-, Walz- bzw. Ziehverfahren hergestellt werden. Es bedarf keiner kostenaufwändigen CVD- oder Epitaxie-Abscheideverfahren im Hochvakuum.

10

In Dach- und Fassadenkonstruktionen integrierte bewegliche Fresnel-Hohlspiegel 11, wie in Figur 3 dargestellt, haben zudem den Vorteil, dass sie mit flächigen Schwachlicht-Solarflächen, wie z. B. die DSC-Technologie (Dye Sensitized Cell) kombiniert werden können, wobei bei Bewölkung die Fresnel-Hohlspiegel 11 so gedreht werden, dass diese DSC-Flächen optimal beleuchtet werden. So kann sowohl direkt gerichtetes als auch diffuses (Streu-) Licht in einem großen Spektralbereich genutzt werden, wodurch sich der Jahresenergieertrag beträchtlich steigern lässt.

Die geräuschlosen und weitgehend wartungsfreien Kollektorflächen können zudem optimal in bestehende Besiedlungsgebiete integriert, an Gebäuden, Straßenlaternen und Masten befestigt werden, da die 5 Kollektorflächen nicht zusammenhängend sein müssen und aus vielen kleinen, auch unterschiedlich designerisch gestalteten Formen und „Inseln“ bestehen können, die zu hohen Lichtleistungen zusammenführbar sind. Der Wirkungsgrad sollte bei geeigneter 10 Dimensionierung der Interferenzspiegelfolien 2 und Halbleiterflächen sowie bei exakter Ausrichtung zur Sonne deutlich höher als bei herkömmlichen Photovoltaik-Anlagen sein. Durch deutlich geringeren Investitionsaufwand und problemlose Standortwahl 15 dürfte jedoch eine höhere Wirtschaftlichkeit auch im Vergleich zu Diffuslicht nutzenden Flächenmodulen zu erzielen sein.

Die Einspeisung in Lichtwellenleiter (LWL) bietet den 20 Vorteil, dass die aufkonzentrierte Lichtenergie großer Flächen jeweils eines definierten Wellenlängenbereichs über eine begrenzte Entfernung auf nicht geradlinigem Wege transportiert und auf kleinste Flächen fokussiert werden kann. Dieses Licht 25 kann zur Beleuchtung fensterloser Innen- bzw. Kellerräume dienen. Es lassen sich auch Anlagen zur katalytischen Wasserzerlegung (Wasserstoffgewinnung), biologischen Abwasserreinigung oder photokatalytische chemische Reaktionen betreiben. Die effektivere 30 Herstellung von Biomasse durch Photosynthese (z. B. Algenproduktion) wird möglich, indem die Fasern in trübe Flüssigkeiten eingetaucht werden, so dass man

21

keine aufwändigen (nicht wärmeisolierbare) Glasrohrschenkel-Konstruktionen mehr benötigt, wie sie vielfach momentan im Einsatz sind. Rot- und Infrarot-Strahlung sind für die Photosynthese in der
5 Regel nicht nutzbar, so dass sie mit der erfundungsgemäßen Vorrichtung anteilig zur Stromerzeugung genutzt werden können. Photosynthese und Stromerzeugung ist mit anderen Einspeisevorrichtungen für Lichtwellenleiter nicht
10 möglich.

15

20

25

30

Bezugszeichen

5 1 Fresnel-Linsen
 (refraktiver Lichtkonzentrator)

10 2 Interferenzspiegelfolie

10 2c Interferenzspiegelfolie
 für rote VIS-Strahlung bis NIR < 1100nm

15 3 abspulende Spindel

15 4 aufspulende Spindel

20 5a Silizium-Photozellen für VIS-Strahlung

20 5b Germanium-Photozellen für NIR-Strahlung

20 5c Photozelle für NIR-Strahlung z. B. aus Ge

25 5d Photozellen für NIR-Strahlung

25 6 Rahmen

30 7 Kühlkörper

30 7a Kühlkörper, Behälter mit Flüssigkeit gefüllt

30 7c Kühlkörper der Photozelle 15c

- 8 untere Begrenzungsplatte
- 9 Lichtwellenleiter,
 z. B. flüssigkeitsgefüllter Schlauch
- 5
- 10 Fresnel-Linsen
 mit frontseitigem Interferenzhohlspiegel für
 blaues Licht
- 10 11 Fresnel-Hohlspiegel
 (reflektiver Lichtkonzentrator)
- 12a Interferenzspiegelfolie
 für grüne und gelbe VIS-Strahlung
- 15
- 12b Interferenzspiegelfolie
 für rote VIS-Strahlung bis NIR < 1100nm
- 15a Photozellen für blaue VIS-Strahlung
- 20
- 15c Photozellen für rote VIS-Strahlung bis
 NIR < 1100nm
- 22a Interferenzspiegelfolie
25 für blaue VIS-Strahlung oder
 UV- und blaue VIS-Strahlung
- 22b Interferenzspiegelfolie
 für grüne und gelbe VIS-Strahlung
- 30
- 25b Photozellen für grüne und gelbe VIS-Strahlung

- 32a Interferenzspiegelfolie
für blaue und grüne VIS-Strahlung
- 32b Interferenzspiegelfolie
für gelbe und rote VIS-Strahlung bis
NIR < 1100nm
- 35b Photozelle für gelbe und rote VIS-Strahlung
bis NIR < 1100nm , z. B. aus Si
- 45a Photozelle für blaue und grüne VIS-Strahlung,
z. B. aus GaAs
- 45b Photozelle für gelbe und rote VIS-Strahlung,
z. B. aus Si
- 55a Photozellen für VIS-Strahlung
- 55b Photozelle für NIR-Strahlung

5. Patentansprüche

10 1. Verfahren zur Energieumwandlung solarer Strahlung in elektrischen Strom und Wärme mit farbselektiven ein oder mehreren Interferenzfilterspiegeln, welche die Sonnenstrahlung in verschiedene Wellenlängenbereiche aufsplitten und auf mehrere für verschiedene Lichtfarben optimierte Halbleiter-Photovoltaikzellen konzentrieren, dadurch gekennzeichnet, dass das Licht mit beweglich angeordneten Interferenzspiegelfolien
15 (2) in mindestens zwei spektrale Wellenlängenbereiche getrennt wird, wobei an jeder Folie jeweils ein Wellenlängenbereich reflektiert und ein Teil transmittiert wird.

20 25 2. Verfahren nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, dass die direkte Sonnenstrahlung vor der Aufsplittung in zwei oder mehrere Wellenlängenbereiche refraktiv oder reflektiv aufkonzentriert wird und eine oder mehrere in einer oder zwei Ebenen bewegliche Interferenzspiegelfolien (2) vor dem Bereich der höchsten Lichtkonzentration als

optischer Brennpunkt so angeordnet werden, dass es jeweils einen optischen Brennpunkt für die von der Interferenzspiegelfolie (2) reflektierte und auch für die durch die 5 Interferenzspiegelfolie (2) transmittierte Lichtfraktion ergibt, wobei sich die geometrische Lage dieser Brennpunkte durch die ein- oder zweidimensionale Bewegung der Interferenzspiegelfolien (2) nicht oder nur 10 unwesentlich ändert.

3. Verfahren nach den Ansprüchen 1 und 2 **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bewegung der Interferenzspiegelfolie (2) außer dem Umspulen von Spindel (3) zu Spindel (4) auch durch 15 axialen Versatz der Spindeln (3 und 4) in Bezug auf die Zone mit der höchsten Lichtkonzentration erfolgt.

20 4. Verfahren nach den Ansprüchen 1 und 3 **dadurch gekennzeichnet**, dass das Umspulen der Interferenzspiegelfolie (2) kontinuierlich oder diskontinuierlich erfolgt.

25 5. Vorrichtung eines Konzentrator-Solarkollektors mit farbselektiven Spiegeln **dadurch gekennzeichnet**, dass in einem gegebenen Rahmen (6) des Solarkollektors oberhalb zum Sonnenlicht hin Linsen, vorzugsweise Fresnel-Linsen (1), angeordnet sind und im optischen Brennpunkt der Linse eine Photozelle vorhanden 30 ist und zwischen der Linse und der Photozelle

beweglich eine Interferenzspiegelfolie (2) angeordnet ist.

6. Vorrichtung nach Anspruch 5 dadurch gekennzeichnet, dass die farbselektive Interferenzspiegelfolie (2) jeweils mit einem flexiblen Folien-Film ausgeführt ist, der jeweils mit einem Abschnitt langsam durch Umspulen von Spindel (3) zu Spindel (4) durch die aufkonzentrierte solare Strahlung beweglich ist.
7. Vorrichtung nach Anspruch 5 dadurch gekennzeichnet, dass im Bereich eines oder mehrerer dieser optischen Brennpunkte Photozellen aus solchen Halbleitermaterialien angeordnet sind, deren Bandlücke auf den jeweiligen Wellenlängenbereich abgestimmt ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 5 dadurch gekennzeichnet, dass im Bereich eines oder mehrerer dieser optischen Brennpunkte jeweils ein Ende eines Lichtwellenleiters (9) oder ein Übergangsstück zu einem solchen Lichtwellenleiter angeordnet ist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 7 dadurch gekennzeichnet, dass die Photozellen auf Kühlkörpern (7) angeordnet sind, die von einer Flüssigkeit durchströmt sind.

28

10. Vorrichtung nach Anspruch 7 dadurch gekennzeichnet, dass die Photozellen auf Kühlkörpern (7) angeordnet sind, die von einem Gas mit einem Betriebsdruck > 1 bar durchströmt sind.

11. Vorrichtung nach Anspruch 9 oder 10 dadurch gekennzeichnet, dass zwischen den Photozellen und den Kühlkörpern (7) ein dünnes Schichtsystem aus Halbleitern mit einer Bandlücke von weniger als 0,7 eV angeordnet ist.

15

20

25

30

Figur 1

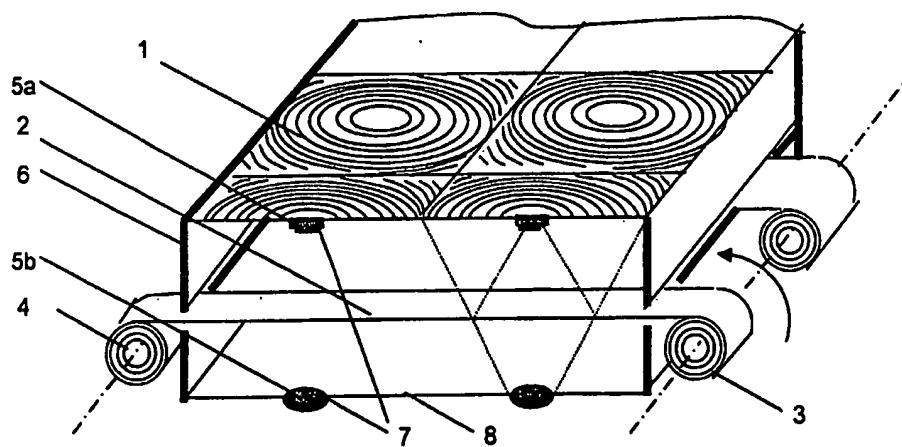
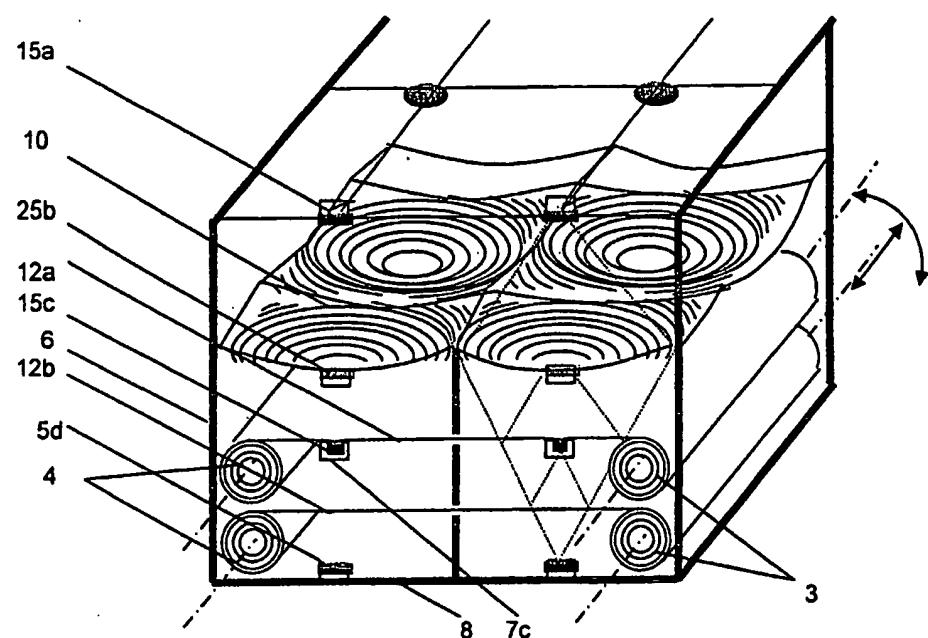
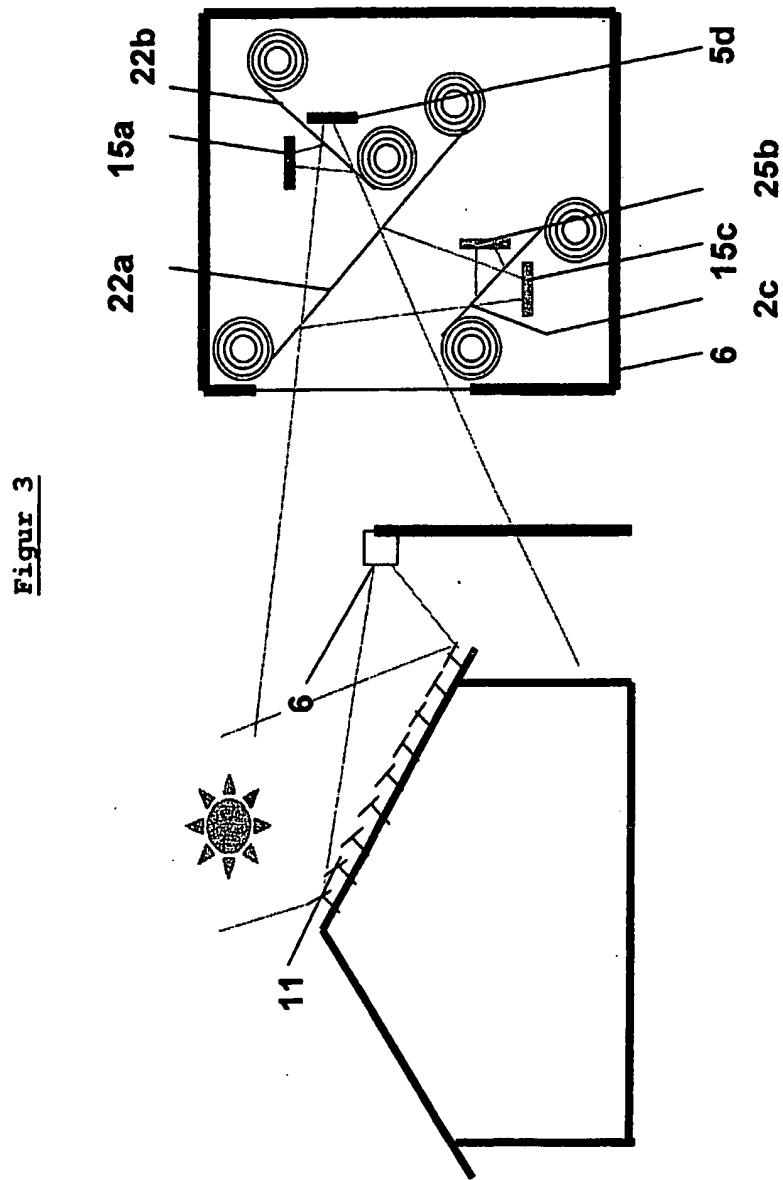
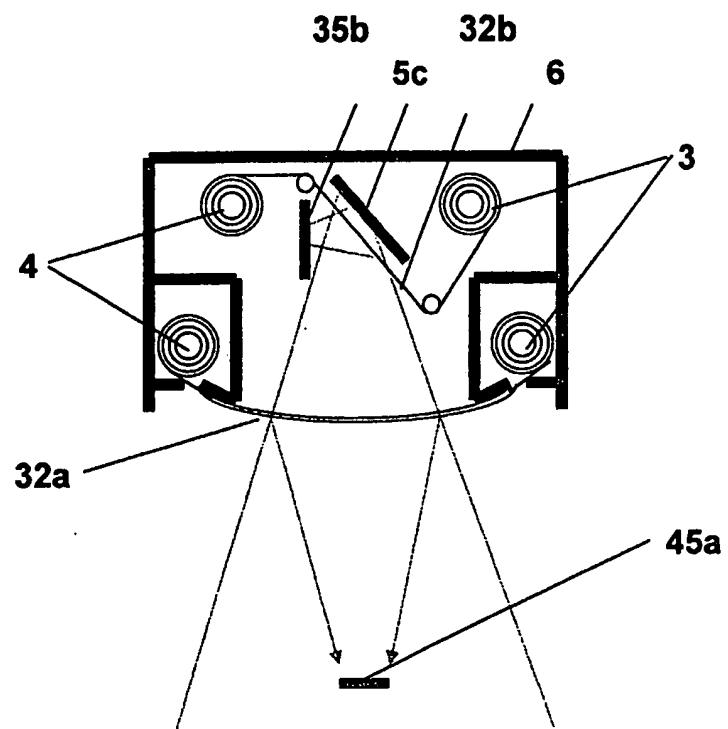
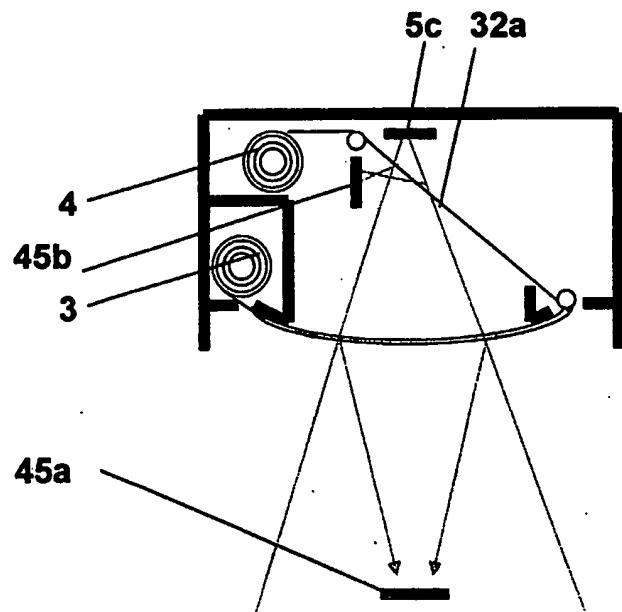


Figure 2



Figur 4

Figur 5

Figur 6